

10/526574

PCT/DE 03/02905

BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND 04 MAR 2005

**PRIORITY
DOCUMENT**

SUBMITTED OR TRANSMITTED IN
COMPLIANCE WITH RULE 17.1(a) OR (b)



REC'D 23 OCT 2003

WIPO

PCT

**Prioritätsbescheinigung über die Einreichung
einer Patentanmeldung**

Aktenzeichen: 102 42 701.1

Anmeldetag: 13. September 2002

Anmelder/Inhaber: LAS-CAD GmbH, München/DE

Bezeichnung: Seitlich gepumpter Festkörperlaser

Priorität: 05.09.2002 DE 102 41 547.1

IPC: H 01 S 3/0941

Die angehefteten Stücke sind eine richtige und genaue Wiedergabe der ursprünglichen Unterlagen dieser Patentanmeldung.

München, den 9. Oktober 2003
Deutsches Patent- und Markenamt
Der Präsident
Im Auftrag

Scholz

Seitlich gepumpter Festkörperlaser

Im Gegensatz zu Lasern, bei denen der Kristallstab von der Stirnseite her gepumpt wird, ist es bei seitlich gepumpten Lasern wesentlich schwieriger, eine optimale Überlappung zwischen Pumplicht und Lasermode zu erreichen. Bei herkömmlichen Systemen wird das aus einer oder mehreren Pumplichtquellen, z.B. Diodenarrays kommende Pumplicht entweder direkt von der Seite in einen zylindrischen Kristall eingestrahlt oder mit Linsen in den Achsenbereich des Kristalls fokussiert. Die sog. "slow axis" der Diodenarrays verläuft bei diesen Anordnungen meist parallel zur Kristallachse. Da die Intensität des Pumplichts nach Eintritt in den Kristall infolge der Absorption exponentiell abnimmt und deshalb ein beträchtlicher Teil der Pumpleistung in unmittelbarer Nähe der Eintrittsstelle absorbiert wird, der Lasermode sich jedoch bei den meisten Anordnungen entlang der Kristallachse ausbildet und somit der Abstand zwischen Eintrittsstelle und Lasermode bei den derzeit realisierbaren Kristalldurchmessern mindestens von der Größenordnung 1 mm ist, ist die Überlappung schwach und somit die Effizienz des Lasers gering. Zudem besteht wegen der unsymmetrischen Verteilung der absorbierten Pumpleistung das Problem, dass transversale Moden höherer Ordnung angeregt werden, wodurch sich die Strahlqualität verschlechtert.

Da jedoch seitlich gepumpte Systeme in Hinblick auf die derzeit interessantesten Pumplichtquellen, nämlich Laserdiodenarrays mit lang gestreckten, sehr schmalen emittierenden Flächen, den endgepumpten Lasern im Prinzip überlegen sind, weil eine kostspielige Umformung des Pumpstrahls entfällt, ist es die Aufgabe der vorliegenden Erfindung, hier eine wesentliche Verbesserung zu schaffen, d.h. einen Laser mit hoher Strahlqualität, der die eingestrahlte Pumpleistung effizient nutzt. Dies ist mit Hilfe einer Anordnung gemäß Anspruch 1 der vorliegenden Erfindung in überraschend einfacher Weise möglich. Vorteilhafte Weiterbildungen der Erfindung sind Gegenstand der Unteransprüche.

Gemäß der Erfindung wird ein aus einer Lichtquelle z.B. einem Laserdiodenarray kommender Pumpstrahl annähernd senkrecht zur Laserstrahlachse, aber vorzugsweise etwas geneigt zum Lot auf die Oberfläche eines Lasermaterial in letzteres eingestrahlt. Um eine effiziente Nutzung der Pumpleistung sicher zu stellen, wird der Pumpstrahl durch optische Elemente wie z.B. Linsen oder Spiegel auf das Lasermaterial fokussiert oder ein Abbild der emittierenden Pumplichtfläche erzeugt, dessen Breite so eingestellt ist, dass eine gute Überlappung zwischen

gepumptem Bereich und Laserstrahl zustande kommt. Da die der Pumplichtquelle abgewandte Seite des Lasermaterials vorzugsweise reflektierend beschichtet ist, wird der Pumplichtstrahl an der der Pumplichtquelle abgewandten Seite des Lasermaterials reflektiert und durchdringt dieses noch einmal, wodurch ein größerer Anteil der Pumpleistung absorbiert wird. Alternativ oder zusätzlich zur Beschichtung des Lasermaterials kann hinter der abgewandten Seite des Lasermaterials auch ein Reflektor, z.B. ein Spiegel, vorgesehen sein, durch den der Pumpstrahl in das Material zurück reflektiert wird. Die Effizienz lässt sich weiter beträchtlich erhöhen, wenn der Pumpstrahl nach dem Austritt aus dem Lasermaterial noch einmal durch einen Reflektor, z.B. einen Spiegel, in das Material zurückgelenkt bzw. abgebildet wird und dann abermals an der Rückwand des Lasermaterials reflektiert wird. Größe und Position dieses zweiten Abbildes werden wiederum vorzugsweise so gewählt, dass eine gute Überlappung mit dem Laserstrahl zustande kommt. Das zweite Abbild liegt deshalb zweckmäßigerweise unmittelbar neben dem ersten oder fällt mit diesem zusammen. Der Pumplichtstrahl wird auf diese Weise viermal durch denselben gepumpten Bereich des Lasermaterials geführt, was eine sehr effiziente Nutzung der Pumpleistung mit sich bringt. Eine alternative Ausführungsform besteht darin, dass das zweite Abbild des Pumpstrahls in gewissem Abstand neben dem ersten liegt, und dass der Pumpstrahl, nachdem er einen zweiten Bereich des Lasermaterials durchstrahlt hat, durch Umlenkspiegel wieder in den ersten Bereich zurückgelenkt wird. In diesem Fall ist es zweckmäßig, dass ein zweiter Pumpstrahl die beiden Bereiche in anderer Reihenfolge durchstrahlt. Bei sehr schwach absorbierenden Materialien kann es zweckmäßig sein, den Pumpstrahl in ähnlicher Weise durch mehr als zwei Bereiche lenken und auch den Laserstrahl mit Hilfe von Umlenkspiegeln durch all diese Bereiche zu leiten.

Wenn im Patent Richtungsangaben wie senkrecht oder parallel mit "in etwa" oder "im wesentlichen" relativiert werden, so bedeutet dies, dass die Hauptrichtung in der bezeichneten Richtung liegt, Abweichungen jedoch von z.B. 20 Grad durchaus möglich sind.

Die Pumplichtquelle ist bevorzugt länglich, d.h. dass eine Ausdehnung deutlich größer als die andere ist, oder besteht aus einer Aneinanderreihung von kleinen Punktlichtquellen entlang einer Vorzugsrichtung. Annähernd parallel zu letzterer erstreckt sich auch der gepumpte Bereich entlang einer Vorzugsrichtung. Der Laserstrahl, der auch gefaltet sein kann, durchstrahlt die gepumpten Bereiche vorzugsweise wiederum entlang dieser Vorzugsrichtung und erstreckt sich somit im wesentlichen zwischen den der Pumplichtquelle zu- und

abgewandten Oberflächen des Lasermaterials und daher auch annähernd parallel zur Pumplichtquelle.

Das Lasermaterial der Erfindung kann beliebige, einem gewünschten Zweck angepasste Geometrien haben, z.B. stab- oder plattenförmig. Im einfachsten Fall ist das Material plattenförmig, es wird jedoch vorgeschlagen zur Erzielung höherer Laserleistungen Stäbe mit quadratischen oder sechseckigen Querschnitten etc. einzusetzen.

Die Kühlung des Lasermaterials kann sowohl mit Hilfe einer strömenden Flüssigkeit als auch mit Hilfe eines Festkörpermaterials hoher Wärmeleitfähigkeit erfolgen. Im Falle eines strömenden Mediums wird vorgeschlagen, dieses über die der Pumplichtquelle zu- und abgewandten Oberflächen des Lasermaterials strömen zu lassen und Temperaturen und/bzw. Querschnitte der Strömungskanäle so zu bemessen, dass eine möglichst symmetrische Temperaturverteilung und somit auch eine möglichst symmetrische thermische Linse im Lasermaterial entsteht, durch welche der Laserstrahl geführt wird.

Durch Verwendung von Polarisationselementen und polarisationsabhängigen Strahlenteilungselementen kann erreicht werden, dass der Pumplichtstrahl nach dem vierten Durchlaufen des Lasermaterials nicht zurück in Richtung der Pumplichtquelle reflektiert wird, sondern auf einen weiteren Reflektor trifft, durch welchen der Strahl nochmals zurück in das Lasermaterial gelenkt wird. Ermöglicht wird dies, in dem der Strahl auf seinem Wege in seiner Polarisationsrichtung gedreht wird, z.B. durch Lambda-Viertel-Plättchen. Vor der Pumplichtquelle ist dann ein Polarisationsstrahlenteiler vorgesehen, durch den erreicht wird, dass der vom Lasermaterial zurückkommende in der Polarisationssebene gedrehte Pumpstrahl einen anderen Weg als der ursprüngliche nimmt, d.h. nicht mehr zur Pumplichtquelle zurückkehrt, sondern auf einen Reflektor gelenkt wird, durch den er wiederum in den gepumpten Bereich des Lasermaterials gelenkt wird. Hierdurch wird ermöglicht, dass der Pumpstrahl den gepumpten Bereich letztlich achtmal durchstrahlt, wie anhand von Fig. 2 genauer ausgeführt wird.

Anstatt für einen Laser kann die Erfindung auch sehr vorteilhaft für einen Laserverstärker eingesetzt werden. In diesem Fall wird vorgeschlagen, die Seitenflächen des Lasermaterials für mögliche Laserwellenlängen antireflektiv zu beschichten, um zu vermeiden, dass sich parasitäre transversale Moden aufbauen, durch welche dem gepumpten Bereich in schädlicher

Weise Strahlungsleistung entzogen wird. Letzteres kann alternativ auch dadurch verhindert werden, dass gegenüberliegende Oberflächen des Lasermaterials leicht zu einander geneigt sind und/oder Seitenflächen aufgeraut sind.

Technische Elemente des Lasers, wie z.B. Pumplichtquellen, Laserstrahlen und optische Elemente können in Ein- oder Mehrzahl vorhanden sein. Im Falle der Verwendung zweier linearer Pumplichtquellen sind diese hintereinander und/oder um einen Winkel vorzugsweise um 90 Grad versetzt angeordnet.

Der Laserstrahl verläuft im Lasermaterial, kann jedoch an den in Vorzugsrichtung der gepumpten Bereiche liegenden Endflächen aus diesem austreten.

Die Erfindung wird nachfolgend beispielsweise anhand bevorzugter Ausführungsbeispiele in Verbindung mit der Zeichnung beschrieben. In dieser zeigen:

Fig. 1 einen Schnitt durch eine erfindungsgemäße Anordnung quer zur Längsausdehnung des Laserstabes 1, der als Platte ausgebildet ist, auf welche von oben ein Laserdiodenarray 5 abgebildet wird,

Fig. 2 einen Schnitt durch eine erfindungsgemäße Anordnung quer zur Längsausdehnung des Laserstabes, der als Platte ausgebildet ist, auf welche von oben ein Laserdiodenarray 5 abgebildet wird, wobei mit Hilfe eines Lambda-Viertel-Plättchens 11 und eines Polarisationsstrahlteilers der einfallende und der rückreflektierte Pumpstrahl so getrennt werden, dass der Pumpstrahl mit Hilfe von Spiegeln achtmal durch die Patte gelenkt wird,

Fig. 3 einen Schnitt durch eine erfindungsgemäße Anordnung quer zur Längsausdehnung des Laserstabes 1, der als Platte ausgebildet ist, auf welche von oben zwei Laserdioden 5 abgebildet werden,

Fig. 4 eine zu Fig. 3 alternative Anordnung, bei welcher Laserdioden 5 und Fokussierungslinsen 13 einerseits und Reflexionsspiegel 7 andererseits alternierend bzgl. des Lotes auf die Laserplatte 1 angeordnet sind,

- Fig. 5 einen Schnitt durch eine erfindungsgemäße Anordnung quer zur Längsausdehnung des Laserstabes 1, der als Platte ausgebildet ist, bei welcher unterschiedlich zu Fig. 1 die Flüssigkeitskühlung durch Wärmesenken aus Festkörpermateriel ersetzt ist,
- Fig. 6 einen Schnitt durch eine erfindungsgemäße Anordnung, bei welcher die Laserplatte zusätzlich von links mit Hilfe einer Laserdiode 5 gepumpt wird,
- Fig. 7 einen Schnitt durch einen erfindungsgemäßen Laserresonator mit einem Laserstab 1, der von oben mit einer Pumpdiode 5 gepumpt wird,
- Fig. 8 einen Schnitt durch einen erfindungsgemäßen Laserresonator mit einem Laserstab 1, der von oben mit zwei Pumpdioden 5 gepumpt wird, die in Richtung der "slow axis" hintereinander angeordnet sind, und
- Fig. 9 einen Schnitt durch einen erfindungsgemäßen Laserresonator, bei dem die Laserstäbe 1 zickzackförmig angeordnet sind.
- Fig. 10 einen Schnitt durch eine erfindungsgemäßen Anordnung, bei dem der Pumpstrahl, nachdem er die Laserplatte nach oben verlassen hat, in einen zweiten Bereich der Platte, der nicht mit dem ersten zusammenfällt, abgebildet wird, aus diesem zurückreflektiert wird, und durch Spiegel wieder in den ersten gelenkt wird.
- Fig. 11 einen Schnitt durch eine erfindungsgemäßen Laserresonator quer zu den Pumpstrahlen, bei welchem der Laserstrahl durch Umlenkspiegel durch die beiden in Fig. 10 dargestellten gepumpten Bereiche gelenkt wird.

In den Figuren sind identische oder funktionsgleiche Teile mit den identischen Bezugszeichen versehen

Bei der Ausführung nach Fig. 1 ist unterschiedlich zu herkömmlichen Anordnungen eine dünne Platte 1 aus laseraktivem Material zwischen zwei Platten 2 und 3 aus Glas oder einem anderen Material, das für die Pumpstrahlung transparent ist, angeordnet. Die Zwischenräume

zwischen Laserplatte und Glasplatten werden von einem flüssigen Kühlmedium 4, das ebenfalls für die Pumpstrahlung transparent ist, durchströmt. Die Unterseite der Laserplatte 1 ist für die Pumpstrahlung hochreflektierend, während die Oberseite antireflektierend beschichtet ist. Der aus einem Diodenarray 5 kommende Pumpstrahl wird mit Hilfe einer Zylinderlinse 6, deren Wölbung in Richtung der sog. "fast axis" des Diodenarrays verläuft, durch die obere Glasplatte und das Kühlmedium hindurch auf die Unterseite der Laserplatte in einen relativ schmalen Streifen abgebildet, dessen Breite in Abhängigkeit von anderen Parametern unten noch genauer spezifiziert wird. Der Einfallswinkel, den die Achse des Pumpstrahls mit der Normalen auf die Platte bildet, ist vorzugsweise etwa von der Größenordnung des halben Öffnungswinkels des Strahls, kann jedoch auch größer oder kleiner sein. Der an der Unterseite der Laserplatte reflektierte sich wieder öffnende Strahl trifft auf einen zylindrisch gewölbten Hohlspiegel 7, durch den er wieder auf die Unterseite der Platte abgebildet wird, wobei der Krümmungsradius des Spiegels so gewählt ist, dass das zweite Abbild des Strahls etwa von der Größenordnung des ersten ist und sich mit diesem überlappt. Der Strahl wird dann nochmals an der Unterseite der Laserplatte in Richtung der Zylinderlinse 5 reflektiert. Da der Pumpstrahl auf diese Weise die Laserplatte viermal durchquert, ist gewährleistet, dass ein erheblicher Anteil der Pumpstrahlung in der Platte absorbiert wird, wodurch in dem von dem Pumpstrahl durchstrahlten Bereich der Laserplatte eine Besetzungsinversion aufgebaut wird. Der Laserstrahl 8 verläuft annähernd durch die Mitte des gepumpten Bereichs senkrecht zur Bildebene.

Um die Effizienz der im vorangehenden Abschnitt angegebenen Pumpanordnung noch zu steigern, wird vorgeschlagen, die Strahlung der Laserdiode zu polarisieren. Im Folgenden wird an Hand von Fig. 2 eine entsprechende erfindungsgemäße Anordnung beschrieben.

Abweichend von Fig. 1 ist bei dieser Ausführung zwischen Linse 6 und Laserplatte 1 ein beliebiger an sich bekannter Polarisationsstrahlenteiler 9 eingefügt. Für solche Strahlenteiler gibt es unterschiedliche Ausführungsformen. Für die in Fig. 2 angegebene Anordnung wurde z.B. ein Foster-Prisma ausgewählt. Es besteht aus zwei prismatisch geschliffenen Körpern aus einem stark doppelbrechenden Material z. B. Kalkspat, dessen optische Achse senkrecht zur Bildebene verläuft, weshalb die Brechungsindizes für Strahlen, die in bzw. senkrecht zur Bildebene polarisiert sind, unterschiedliche Werte besitzen. Die beiden Körper sind entlang einer Grenzfläche 10 miteinander verbunden, wobei je nach Ausführungsform entweder ein schmaler Luftspalt zwischen den Körpern bestehen bleibt oder dieser Spalt mit einem Kitt ausgefüllt ist, dessen Brechungsindex deutlich kleiner als der Brechungsindex des

doppelbrechenden Materials ist. Der aus der Laserdiode 5 kommende, senkrecht zur Bildebene polarisierte Strahl (• • •), der wiederum mit Hilfe einer Zylinderlinse konvergent gemacht wird, tritt schräg von rechts oben in das Foster-Prisma 9 ein. Der Auftreffwinkel des Strahls auf die Grenzfläche 10 ist so gewählt, dass dieser größer als der Grenzwinkel der Totalreflexion ist. Der Pumpstrahl wird daher an der Grenzfläche 10 totalreflektiert und verlässt dann das Foster-Prisma in Richtung der Laserplatte. Die Brechkraft der Linse 6 ist so gewählt, dass der Pumpstrahl wie in Fig. 1 auf einen schmalen Streifen auf der Unterseite der Laserplatte abgebildet wird. Er wird dort reflektiert und durchstrahlt nun auf seinem Weg zum Spiegel 7 unterschiedlich zu Fig. 1 ein Lambda-Viertel-Plättchen 11, welches das linear polarisierte Licht in zirkulärpolarisiertes verwandelt. Bei der Reflexion am Spiegel 7 bleibt zwar der Drehsinn der Polarisation bezüglich der Ausbreitungsrichtung erhalten, da sich jedoch letztere umkehrt, ändert sich auch der tatsächliche Drehsinn der Polarisation. Der auf das Lambda-Viertel-Plättchen von oben auftreffende Strahl wird daher zwar nun wieder in linear polarisiertes Licht zurückverwandelt, dessen Polarisationsrichtung im Vergleich zur ursprünglichen jedoch um 90° gedreht ist. Die Polarisationsrichtung des Pumpstrahls liegt daher, wenn dieser auf dem Weg zur Laserplatte das Lambda-Viertel-Plättchen ein zweites Mal passiert hat, in der Bildebene ($\uparrow \downarrow \uparrow$). Dieser Strahl wird nun wieder von der Unterseite der Laserplatte in das Foster-Prisma gelenkt, wird aber nun, da der Brechungsindex des doppelbrechenden Materials für Licht, das in der Bildebene polarisiert ist, kleiner ist, nicht mehr an der Grenzfläche 10 totalreflektiert, sondern durchdringt letztere ohne Richtungsänderung und mit nur geringen Intensitätsverlusten. Der Strahl verlässt das Foster-Prisma nun an der Oberseite, wird durch den Zylinderspiegel 12 in das Foster-Prisma zurückreflektiert, auf die Unterseite der Laserplatte abgebildet, zum Spiegel 7 umgelenkt und von dort wiederum zur Laserplatte zurückreflektiert. Der Pumpstrahl durchstrahlt daher nach seiner Reflexion an Spiegel 12 die Laserplatte noch viermal und passiert daher die Laserplatte auf seinem gesamten Weg von Laserdiode her insgesamt achtmal. Es wird daher bei dieser Ausführungsform im Unterschied zur Ausführung nach Fig. 1 ein deutlich größerer Anteil der Pumpstrahlung in der Laserplatte absorbiert, z.B. bei Nd-YAG bei Verwendung derzeit kommerziell erhältlicher Laserdioden und einer Plattendicke von 0.5 mm etwa 80%. Wie bereits oben erwähnt, sind eine Reihe von Ausführungsformen für Polarisationsstrahlenteiler bekannt, welche für die Zwecke dieser Anordnung mehr oder weniger gut geeignet sind. Grundidee dieser vorteilhaften Ausgestaltung der Erfindung ist es somit, dass basierend auf dem hier dargelegten Prinzip mit Hilfe einer Drehung der Polarisationssebene und von

Polarisationsstrahlenteilern zusätzliche Durchgänge des Pumpstrahls durch die Laserplatte realisiert werden.

Eine weitere Steigerung der absorbierten Pumpleistung wird erreicht, wenn das Licht mehrerer Laserdioden in die Laserplatte abgebildet wird. Dies wird anhand von Fig. 3 für zwei Laserdioden gezeigt, es können jedoch basierend auf dem in Fig. 3 offenbarten Prinzip durchaus mehrere Dioden 5 in die Laserplatte abgebildet werden. Da der Öffnungswinkel des die Linse 6 verlassenden Strahls relativ klein wird, wenn man den Abstand zwischen Linse und Laserplatte entsprechend groß wählt, können, wie in Fig. 3 dargestellt, zwei oder mehrere Linsen nebeneinander angeordnet werden, durch welche die Strahlen der Dioden auf die Laserplatte abgebildet werden. Um die Öffnungswinkel der Strahlen und somit auch die Einfallswinkel der äußeren Strahlen noch mehr zu verkleinern, wird vorgeschlagen anstatt einfacher Zylinderlinsen Linsensysteme 13 zu benutzen, mit dem Zweck die sphärischen Aberrationen zu reduzieren. Da solche Linsensysteme Stand der Technik sind, wurden sie in Fig. 3 nur schematisch dargestellt. Um den Einfallswinkel der Strahlen auf die Laserplatte – gemeint ist der Winkel, den die Strahlen mit dem Lot auf die Platte 1 bilden – weiter zu verkleinern, wird vorgeschlagen, zusätzlich eine zylindrische Zerstreuungslinse 14 vor der oberen Glasplatte 2 in den Strahlengang einzubringen. Unterschiedlich zur Einstrahlung mit nur einer Diode bietet die Einstrahlung mit mehreren Dioden die Möglichkeit, das auf der Laserplatte ankommende gesamte Strahlprofil durch gezielte Überlagerung der Profile der einzelnen Strahlen zu steuern. Um dies zu erreichen wird vorgeschlagen, die einzelnen Strahlen nicht exakt aufeinander abzubilden, sondern deren Strahlprofile nach rechts oder links etwas gegeneinander zu verschieben, um auf diese Weise ein mehr kastenförmiges Gesamtprofil zu realisieren, mit dem Zweck, die resultierende Temperaturverteilung besser an eine Parabelform anzunähern. Um auch bei der Anordnung nach Fig. 3 einen achtfachen Durchgang der einzelnen Pumpstrahlen durch die Laserplatte zu realisieren, wird vorgeschlagen, auch hier die Polarisationsebenen der einzelnen Pumpstrahlen mit Hilfe von z.B. Lambda-Viertel-Plättchen zu drehen, die Strahlengänge mit Hilfe von Polarisationsstrahlteilern zu separieren und die gedrehten Strahlen analog zur Ausführung nach Fig. 2 mit Hilfe zusätzlicher Spiegel 12 auf die Laserplatte zurückzureflektieren. Diese alternative Ausführungsform wurde jedoch nicht graphisch dargestellt.

Um die räumliche Anordnung der Elemente zu erleichtern und um das transversale Gesamtprofil des Pumpstrahls symmetrischer zu machen, wird vorgeschlagen Laserdioden 5

und Fokussierungslinsen 13 einerseits und Reflexionsspiegel 7 andererseits alternierend bzgl. des Lotes auf die Laserplatte 1 anzuordnen, wie das anhand von Fig. 4 gezeigt wird.

Fig. 5 zeigt eine erfindungsgemäße Anordnung, bei welcher unterschiedlich zu Fig. 1 die Flüssigkeitskühlung durch Wärmesenken aus einem Festkörpermateriale hoher Wärmeleitfähigkeit ersetzt ist, welche in Form der vier Platten 17 die Laserplatte von oben und unten kühlen. Der Spalt zwischen den beiden oberen Platten ermöglicht den Eintritt des Pumpstrahls in die Laserplatte. Um zu gewährleisten, dass die resultierende Temperaturverteilung symmetrisch ist, können optional auch die beiden unteren Platten durch einen Spalt getrennt sein.

Um die gesamte absorbierte Pumpleistung noch weiter zu steigern, wie dies z. B. für Anwendungen in der Materialbearbeitung wünschenswert ist, wird vorgeschlagen, den Laserstab nicht nur von oben sondern auch von der linken oder der rechten Seite bzw. von unten, d.h. letztlich von mehreren Seiten zu pumpen. Eine entsprechende Anordnung ist in Fig. 6 dargestellt. Hier wird eine weitere Laserdiode 5 mit Hilfe einer Linse 6 von links in den Laserstab 1 abgebildet, dessen Querschnitt nahezu quadratisch ist, an der rechten Begrenzungsfläche reflektiert und wie für die Einstrahlung von oben bereits beschrieben durch einen Zylinderspiegel 7 in den Laserstab zurückreflektiert. Der Laserstab 1 ist an den Seiten von einem Behälter, Gehäuse bzw. Kasten 18 umgeben, der für die Pumpstrahlung transparent ist. In den Zwischenräumen zwischen Laserstab und Kasten befindet sich ein strömendes Kühlmedium 4. Der Laserstrahl 8 bildet sich innerhalb des Stabes entlang der Längsrichtung aus. Zur weiteren Steigerung der Leistung wird auch hier vorgeschlagen, Polarisationsstrahlenteiler und Lambda-Viertel-Plättchen in den Strahlengang einzufügen und/oder mit mehreren Dioden einzustrahlen wie dies anhand der Figuren 2 bis 4 für die Einstrahlung von oben bereits beschrieben wurde. Zur weiteren Steigerung der Laserleistung wird vorgeschlagen, einen Laserstab mit einem sechs- oder achteckigen Querschnitt zu benutzen und von entsprechend vielen Seiten einzustrahlen.

Die Auslegung des optischen Resonators hängt von den Eigenschaften des verwendeten Lasermaterials ab. Bei Materialien mit positiver Ableitung dn/dT des Brechungsindex n nach der Temperatur T wie Nd:YAG bildet sich entlang des gepumpten Bereichs, also in den Figuren 1 bis 6 senkrecht zur Bildebene, eine annähernd symmetrische thermische Linse aus, in welcher der Lasermode wie in einem Wellenleiter geführt wird. In diesem Fall genügt es die

senkrecht zu dem gepumpten Bereich verlaufenden Endflächen der Platte eben zu schleifen, zu verspiegeln und als Endflächen für einen Laserresonator zu benutzen. Abhängig von der Größe des Differentialquotienten dn/dT und der absorbierten Pumpleistung kann die thermische Linsenwirkung so stark sein, dass das transversale Profil des Laserstrahls zu schmal wird, um den gepumpten Bereich ausreichend zu überlappen, wodurch die Effizienz des Lasers reduziert wird. Um dies zu vermeiden, wird vorgeschlagen die ebenen Endflächen der Laserplatte für die Laserstrahlung antireflektierend zu beschichten und separate Endspiegel 15 für den Laserresonator zu benutzen, wie dies in Fig. 7 dargestellt ist. Um die Konstruktion möglichst einfach zu gestalten, sind diese externen Spiegel bevorzugt eben, gegebenenfalls können jedoch gekrümmte Spiegel vorteilhaft sein. Wird ein Lasermaterial benutzt, bei dem die Ableitung des Brechungsindex nach der Temperatur verschwindet oder negativ ist, sind gekrümmte Endspiegel des Laserresonators sogar notwendig. Zur Steuerung der Überlappung von gepumptem Bereich und Lasermode wird weiterhin alternativ vorgeschlagen die Breite des gepumpten Bereichs durch Änderung der Brennweiten der Linsen 6 und der Spiegel 7 zu optimieren.

Fig. 8 zeigt eine erfindungsgemäße Anordnung, bei der zwei lineare Pumpquellen, z.B. Laserdiodenarrays 5 in Richtung der "slow axis" hintereinander angeordnet sind. Auf dieselbe Weise können natürlich auch mehrere Dioden angeordnet werden.

Fig. 9 zeigt eine erfindungsgemäße Anordnung nach Art eines gefalteten Resonators, bei der mehrere Laserplatten zickzackförmig zwischen Spiegeln 16 angeordnet sind. Die nicht gezeichneten Laserdioden, deren Strahlen analog zu Fig. 1 bzw. 2 oder 3 in die Laserplatten abgebildet werden, befinden sich vor der Bildebene senkrecht über den Platten. Alternativ wird vorgeschlagen, die einzelnen Platten durch eine einzige durchgehende Platte zu ersetzen, wobei jedoch die Laserdioden weiterhin zickzackförmig angeordnet bleiben.

Um den technischen Aufwand zur Realisierung der in den vorangehenden Abschnitten beschriebenen Anordnungen bei gleicher Effizienz zu reduzieren wird anhand von Fig. 10 eine Anordnung beschrieben, bei welcher ein achtfacher Durchgang des Pumpstrahls durch eine Laserplatte 1 ohne Zuhilfenahme von Polarisationsstrahlenteilern realisiert wird. Zu diesem Zweck wird der von der Pumpquelle 5 emittierte und durch die Linse 6 auf das Lasermaterial 1 abgebildete Pumpstrahl, nachdem er die Laserplatte 1 nach oben verlassen hat, durch einen Umlenkspiegel 19 auf einen Bereich abgebildet, der links neben dem ersten durchstrahlten

Bereich liegt. Dort wird der Pumpstrahl wieder an der Unterseite der Platte reflektiert, zu einem Spiegel 20 gelenkt, durch den er wieder in den zweiten Bereich zurückreflektiert wird, und sodann durch Reflektion an dem Umlenkspiegel 19 wieder in den ersten Bereich gelenkt wird. Gleichzeitig wird ein zweiter Pumpstrahl aus der Laserdiode 21 durch eine Linse 6 in den linken Bereich abgebildet, an der Unterseite der Laserplatte reflektiert und, nachdem er die Laserplatte verlassen hat, auf einen Spiegel 22 gelenkt, durch den er senkrecht von oben in den rechten gepumpten Bereich abgebildet wird. Er wird daher, nachdem er an der Unterseite der Platte reflektiert wurde, wieder zu dem Spiegel 22 gelenkt und von diesem wieder in den linken gepumpten Bereich abgebildet. Beide Pumpstrahlen durchstrahlen also die beiden gepumpten Bereiche jeweils achtmal. Wie man leicht erkennt, ist es nicht notwendig dass der zweite Pumpstrahl senkrecht auf den rechten Bereich abgebildet wird. Ist dies nicht der Fall, so wird ein weiterer Umlenkspiegel benötigt. Außerdem ist es möglich, die Pumpstrahlen mit Hilfe von Umlenkspiegeln durch drei oder mehr nebeneinander liegende Bereiche zu lenken, sofern dies zur Absorption der Pumpstrahlen technisch sinnvoll ist. Fig. 11 zeigt einen erfindungsgemäßen Resonator, bei welchem der Laserstrahl mit Hilfe von Umlenkspiegeln 23 durch zwei gepumpte Bereiche gelenkt wird.

Weiter wird vorgeschlagen, die anhand der Figuren 1 bis 11 beschriebenen Anordnungen zum Pumpen und Kühlen von Laserstäben für Laserverstärker zu benutzen, indem ein externer Laserstrahl von der Stirnseite her entlang der gepumpten Bereiche in den Laserstab eingekoppelt wird. Um bei dieser Benutzung der Erfindung parasitäre transversale Lasermoden in den Stäben zu vermeiden, wird vorgeschlagen, die Seitenflächen der Laserplatten bzw. -stäbe für in Frage kommende Laserwellenlängen antireflektierend zu beschichten oder nicht exakt parallel zueinander zu schleifen. Falls die Pumpstrahlen nur von oben kommen, wird vorgeschlagen, die rechte und die linke Seitenfläche des Stabs aufzurauen.

Patentansprüche:

1. Festkörperlaser, bei welchem laseraktives Material (1) mit Hilfe wenigstens einer Pumplichtquelle (5), z. B. eines oder mehrerer Laserdiodenarrays, zumindest in etwa senkrecht zur Achse eines im wesentlichen im Lasermaterial (1) verlaufenden Laserstrahls gepumpt wird, wobei die Pumpstrahlen mit Hilfe von fokussierenden optischen Elementen, z.B. Zylinderlinsen (6) in das Material abgebildet bzw. fokussiert werden, dadurch gekennzeichnet, dass wenigstens eine der Eintrittsfläche gegenüberliegende Begrenzungsfläche im Material (1) vorgesehen ist, die derart ausgebildet ist, dass die Pumpstrahlen an dieser reflektiert werden und das Lasermaterial nochmals durchstrahlen und/oder dass sich hinter dieser gegenüberliegenden Begrenzungsfläche ein externer Reflektor befindet, der die Pumpstrahlen in das Material zurücklenkt.
2. Festkörperlaser nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass Reflektoren (7), z.B. Zylinderspiegel vorgesehen sind, die den Pumpstrahl, nachdem er das Material ein zweites Mal durchstrahlt und verlassen hat, ein weiteres Mal in das Material zurücklenken.
3. Festkörperlaser nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, dass die mit Hilfe der optischen Elemente (6) und die mit Hilfe der Reflektoren (7) im Lasermaterial (1) erzeugten Abbilder der Pumpstrahlen sich teilweise oder ganz überlappen.
4. Festkörperlaser nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Reflektivität der der Eintrittsfläche gegenüberliegenden Begrenzungsfläche des Materials (1) mit Hilfe einer entsprechenden Beschichtung und/oder durch geeignete Wahl des Auftreffwinkels erhöht wird.
5. Festkörperlaser nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die emittierenden Flächen der Pumplichtquellen in einer Richtung deutlich länger sind als in der anderen, oder dass eine Reihe von kleinen emittierenden Flächen entlang einer Vorzugsrichtung angeordnet sind.
6. Festkörperlaser nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Fläche, durch welche die Pumpstrahlen in das laseraktive Material (1) eintreten, und/oder die gegenüberliegende Begrenzungsfläche plan sind.

7. Festkörperlaser nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass sich der Laserstrahl (8) zumindest annähernd parallel zwischen den seitlichen Begrenzungsflächen des Materials (1) ausbildet.

8. Festkörperlaser nach einem der Ansprüche 2 bis 7, dadurch gekennzeichnet, dass sich zwischen dem Lasermaterial (1) und den Spiegeln (7) optische Elemente (11), z.B. Lambda-Viertel-Plättchen befinden, welche von den Pumpstrahlen auf dem Weg zu den Spiegeln (7) und zurück durchstrahlt werden, und dass mit Hilfe dieser Elemente die Polarisationsrichtung der Strahlen auf diesem Weg, vorzugsweise insgesamt um 90° , gedreht wird.

9. Festkörperlaser nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, dass sich auf dem Weg der Pumpstrahlen zwischen den Pumplichtquellen (5) und den Lambda-Viertel-Plättchen (11) optische Elemente (9) z. B. Polarisationsstrahlenteiler befinden, mit deren Hilfe die Strahlengänge der von den Pumplichtquellen kommenden Strahlen einerseits und die Strahlen, deren Polarisationssebene durch die optischen Elemente (11) um 90° gedreht wurde, andererseits räumlich getrennt werden, und dass letztere mit Hilfe von Reflektoren (12) z.B. Zylinderspiegeln wiederum in das Lasermaterial (1) abgebildet werden.

10. Festkörperlaser nach Anspruch 9, dadurch gekennzeichnet, dass die Polarisationsstrahlenteiler als Foster-Prismen ausgebildet sind.

11. Festkörperlaser nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Zylinderlinsen (6), welche die Pumplichtquellen in das Lasermaterial abbilden, als Linsensysteme (13) zur Reduktion der sphärischen Aberration ausgebildet sind.

12. Festkörperlaser nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass sich in geringem Abstand vor dem Lasermaterial (1) eine zylindrische Zerstreuungslinse (14) befindet, mit dem Zweck, die Auftreffwinkel der Pumpstrahlen auf die Platte zu verkleinern.

13. Festkörperlaser nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass mehrere Pumplichtquellen senkrecht zu ihrer Längsausdehnung in seitlicher Richtung nebeneinander angeordnet sind und deren Strahlen auf das Lasermaterial (1) unter unterschiedlichen Winkeln auftreffen.

14. Festkörperlaser nach Anspruch 13, dadurch gekennzeichnet, dass sich die Abbilder der Pumplichtquellen in dem Lasermaterial nicht exakt überlagern, sondern senkrecht zu ihrer Längsausdehnung seitlich leicht verschoben sind, mit dem Zweck dass das aus der Überlagerung der Pumpstrahlen sich ergebende transversale Pumpprofil einem Kastenprofil ähnlich wird.
15. Festkörperlaser nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass mehrere Pumplichtquellen parallel zu ihrer Längsausdehnung einzeln oder in Gruppen hintereinander angeordnet sind, mit dem Zweck einen streifenförmigen Bereich zu pumpen, dessen Länge ein Vielfaches der Länge der einzelnen Pumplichtquellen beträgt, wobei sich dieser Bereich auch aus Teilstücken zusammensetzen kann.
16. Festkörperlaser nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass wenigstens eine Oberfläche, vorzugsweise gegenüberliegende Oberflächen des Lasermaterials (1) mit Hilfe eines flüssigen Mediums gekühlt wird.
17. Festkörperlaser nach Anspruch 16, dadurch gekennzeichnet, dass das Kühlmedium an gegenüberliegenden Seiten des Lasermaterials unterschiedliche Temperaturen aufweist, z. B. indem das Medium, welches zum Kühlen einer der beiden Seiten dient, beheizt wird, mit dem Zweck Asymmetrien der Temperaturverteilung in der Lasermaterial (1) auszugleichen.
18. Festkörperlaser nach Anspruch 16 oder 17, dadurch gekennzeichnet, dass die Querschnitte der Strömungskanäle beidseitig des Lasermaterials (1) unterschiedlich bemessen sind, um die Laserplatte an Ober- und Unterseite verschieden stark zu kühlen.
19. Festkörperlaser nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass das Lasermaterial (1) mit Hilfe von Wärmesenken bestehend aus einem Festkörpermateriail hoher Wärmeleitfähigkeit gekühlt wird, die einen Spalt freilassen, durch den der Pumpstrahl in das Lasermaterial eindringen kann.
20. Festkörperlaser nach Anspruch 19, dadurch gekennzeichnet, dass auf unterschiedliche Temperaturen gekühlte Wärmesenken vorgesehen sind, mit dem Zweck Asymmetrien der Temperaturverteilung in dem Lasermaterial (1) auszugleichen.

21. Festkörperlaser nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass das Lasermaterial (1) von mehreren Seiten gepumpt wird, indem das Licht von Pumplichtquellen (5) mit Hilfe von optischen Elementen z.B. Zylinderlinsen (6) von einer oder mehreren Seiten in ein stabförmiges Lasermaterial (1) abgebildet wird und, nachdem es an der gegenüberliegenden Begrenzungsfläche reflektiert wurde, letzteres nochmals durchstrahlt.
22. Festkörperlaser nach Anspruch 21, dadurch gekennzeichnet, dass ein Teil oder alle in den vorhergehenden Ansprüchen definierten technischen Elemente, um die Pumpstrahlen abzubilden, umzulenken, zu reflektieren oder zu polarisieren auch auf die von der/den anderen Seite(n) kommenden Strahlen angewandt werden.
23. Festkörperlaser nach Anspruch 21 oder 22, dadurch gekennzeichnet, dass das Lasermaterial (1) an den Seiten von einem Kasten (18) umgeben ist, der für die Pumpstrahlung transparent ist, und dass in den Zwischenräumen zwischen Lasermaterial und Kasten ein Kühlmedium (4) strömt.
24. Festkörperlaser nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Stirnflächen des Lasermaterials (1) senkrecht zur Längsausdehnung des gepumpten Bereichs eben geschliffen und verspiegelt sind und somit als Endspiegel für einen Laserresonator dienen.
25. Festkörperlaser nach einem der Ansprüche 1 bis 23, dadurch gekennzeichnet, dass externe also von dem Lasermaterial (1) getrennte Endspiegel (15) für die Bildung eines Laserresonators benutzt werden.
26. Festkörperlaser nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die gepumpten Bereiche zickzackförmig zwischen Umlenkspiegeln angeordnet sind, so dass ein gefalteter Strahlengang entsteht.
27. Festkörperlaser nach einem der Ansprüche 1 bis 23 bzw. 26, dadurch gekennzeichnet, dass unter Vermeidung von Resonator-Endspiegeln die in dem Lasermaterial (1) aufgebaute

Inversion zum Verstärken eines von außen in die Platte eingekoppelten Laserstrahls benutzt wird.

28. Festkörperlaser nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass eine oder mehrere Oberflächen des Lasermaterials (1) für mögliche Laserwellenlängen antireflektierend beschichtet sind.

29. Festkörperlaser nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass einige der gegenüberliegenden Seitenflächen des Lasermaterials (1) leicht zueinander geneigt sind.

30. Festkörperlaser nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass eine oder mehrere Seitenflächen des Lasermaterials aufgeraut sind.

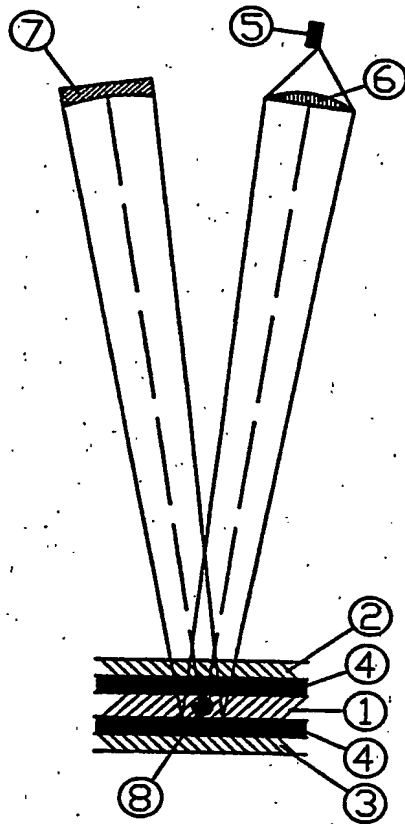
31. Festkörperlaser nach Anspruch 2 oder nach einem der Ansprüche 4 bis 30, dadurch gekennzeichnet, dass die mit Hilfe der optischen Elemente (6) und die mit Hilfe der Reflektoren (7) bzw. (21) im Lasermaterial (1) erzeugten Abbilder der Pumpstrahlen nebeneinander liegen und dass der Pumpstrahl, nachdem er den zweiten Bereich durchstrahlt hat, mit Hilfe von Umlenkspiegeln wieder in den ersten zurückgelenkt wird und diesen nochmals durchstrahlt.

32. Festkörperlaser nach Anspruch 31, dadurch gekennzeichnet, dass der Pumpstrahl, nachdem er den zweiten Bereich durchstrahlt hat, durch Umlenkspiegel in einen dritten nebeneinander liegenden Bereich und so fort gelenkt wird, und sodann von dem letzten durchstrahlten Bereich in umgekehrter Reihenfolge wieder durch die vorher durchstrahlten Bereiche gelenkt wird.

33. Festkörperlaser nach Anspruch 31 oder 32, dadurch gekennzeichnet, dass weitere Pumpstrahlen einige oder mehrere der von dem ersten Strahl gepumpten Bereiche in anderer Reihenfolge durchstrahlen.

33. Festkörperlaser nach Anspruch 31, 32 oder 33, dadurch gekennzeichnet, dass der Laserstrahl mit Hilfe von Umlenkspiegeln nacheinander durch die gepumpten Bereiche gelenkt wird.

Zeichnung für Zusammenfassung



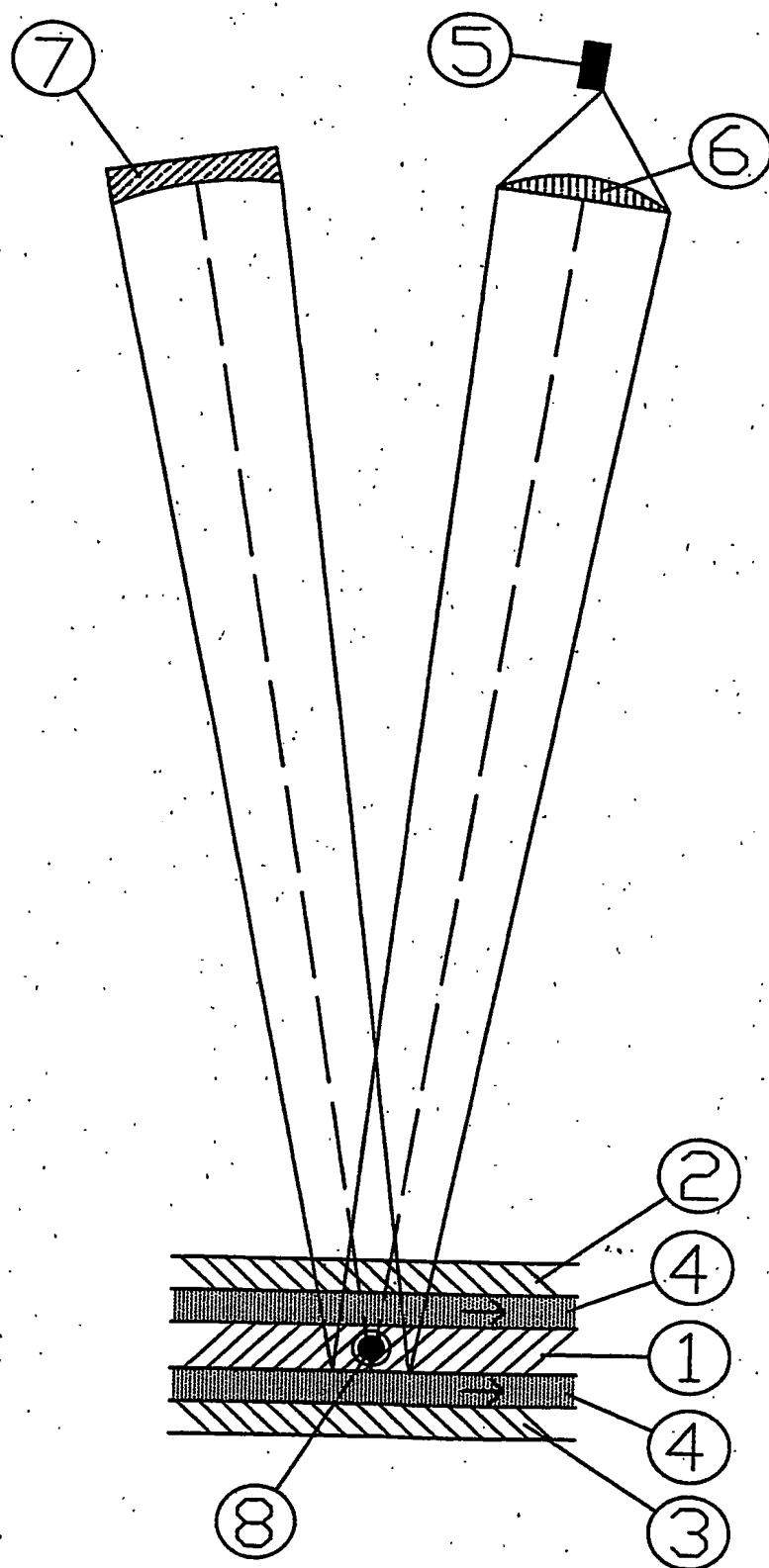


Fig. 1

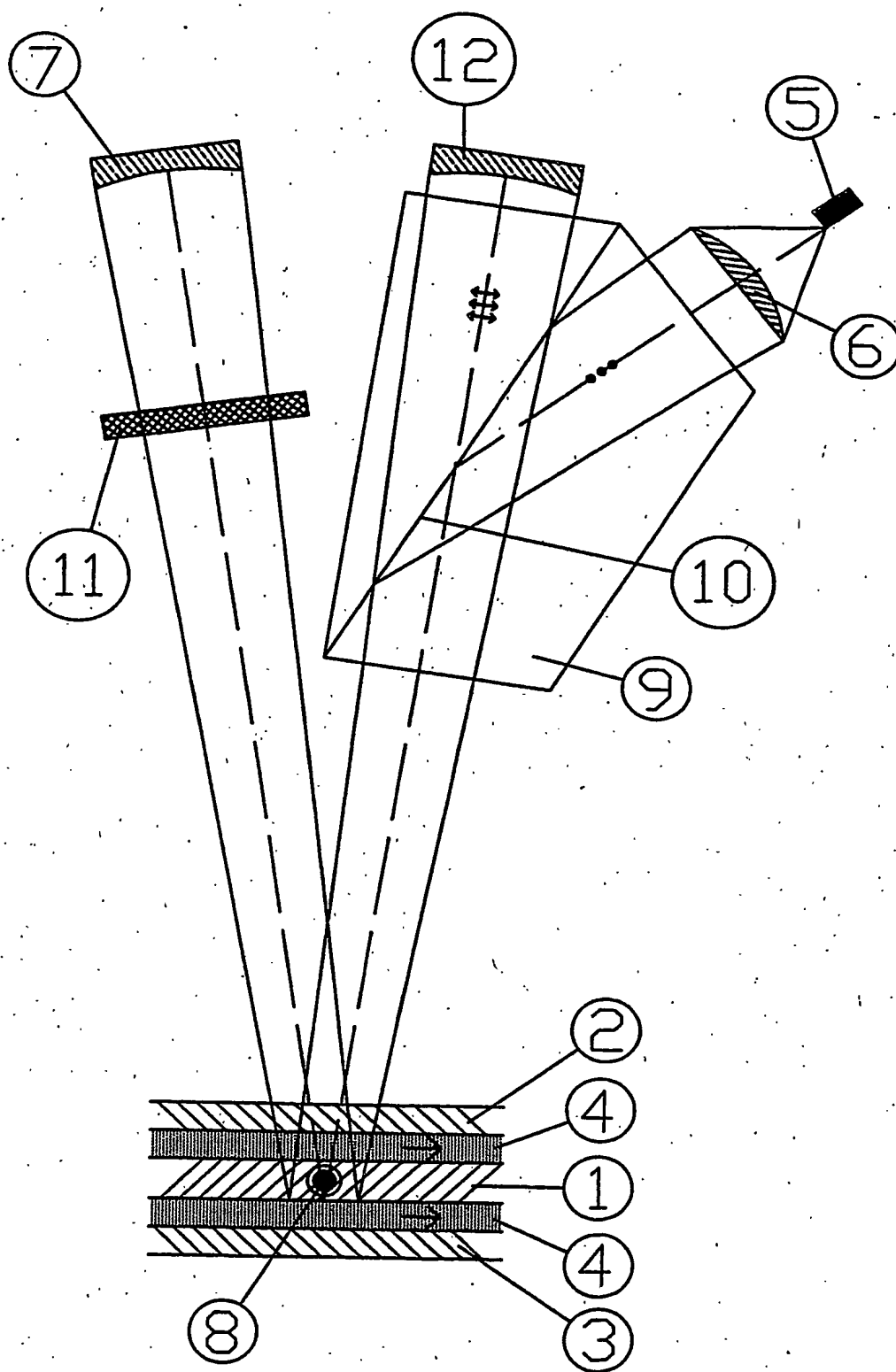


Fig. 2

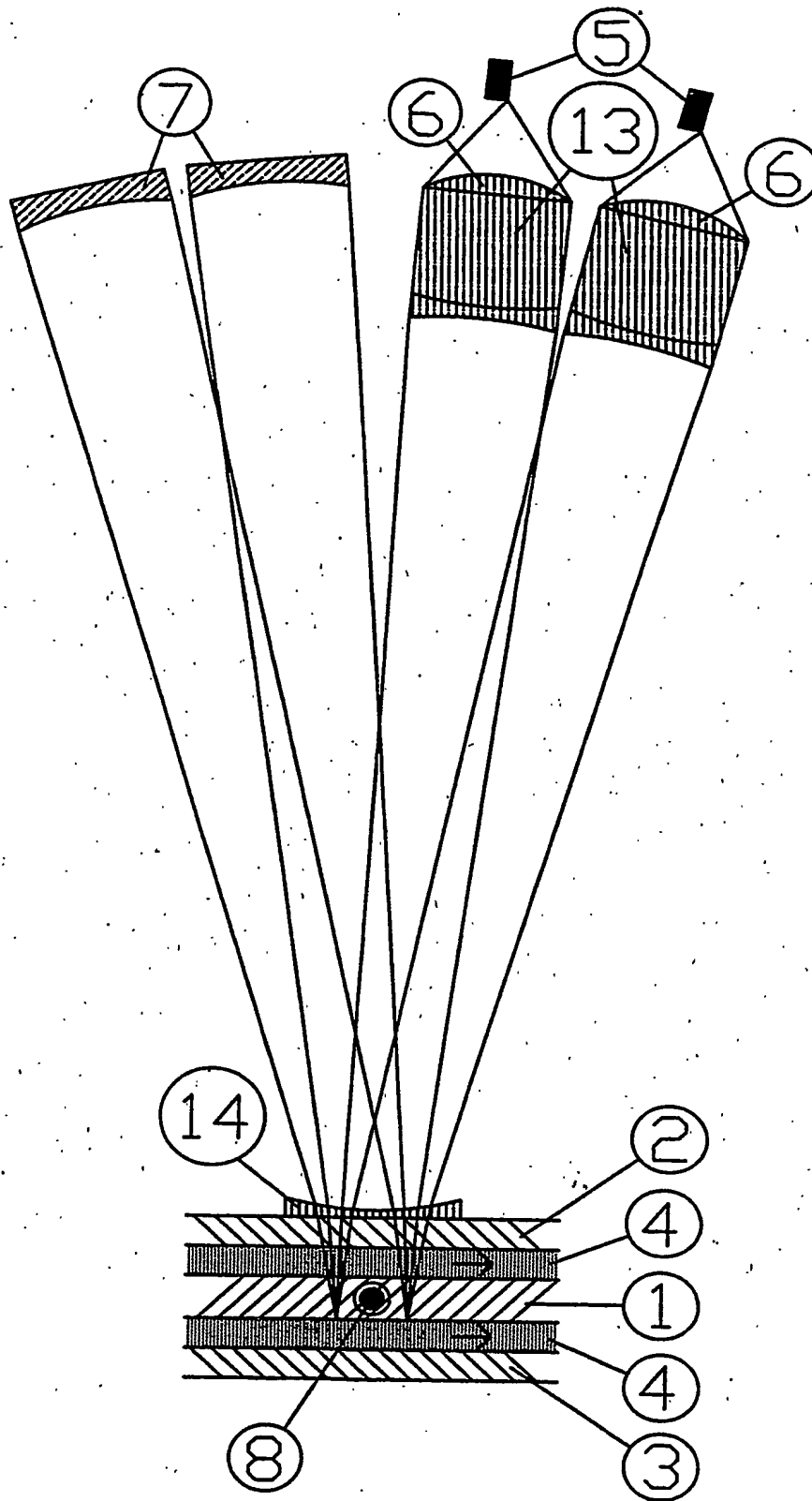


Fig. 3

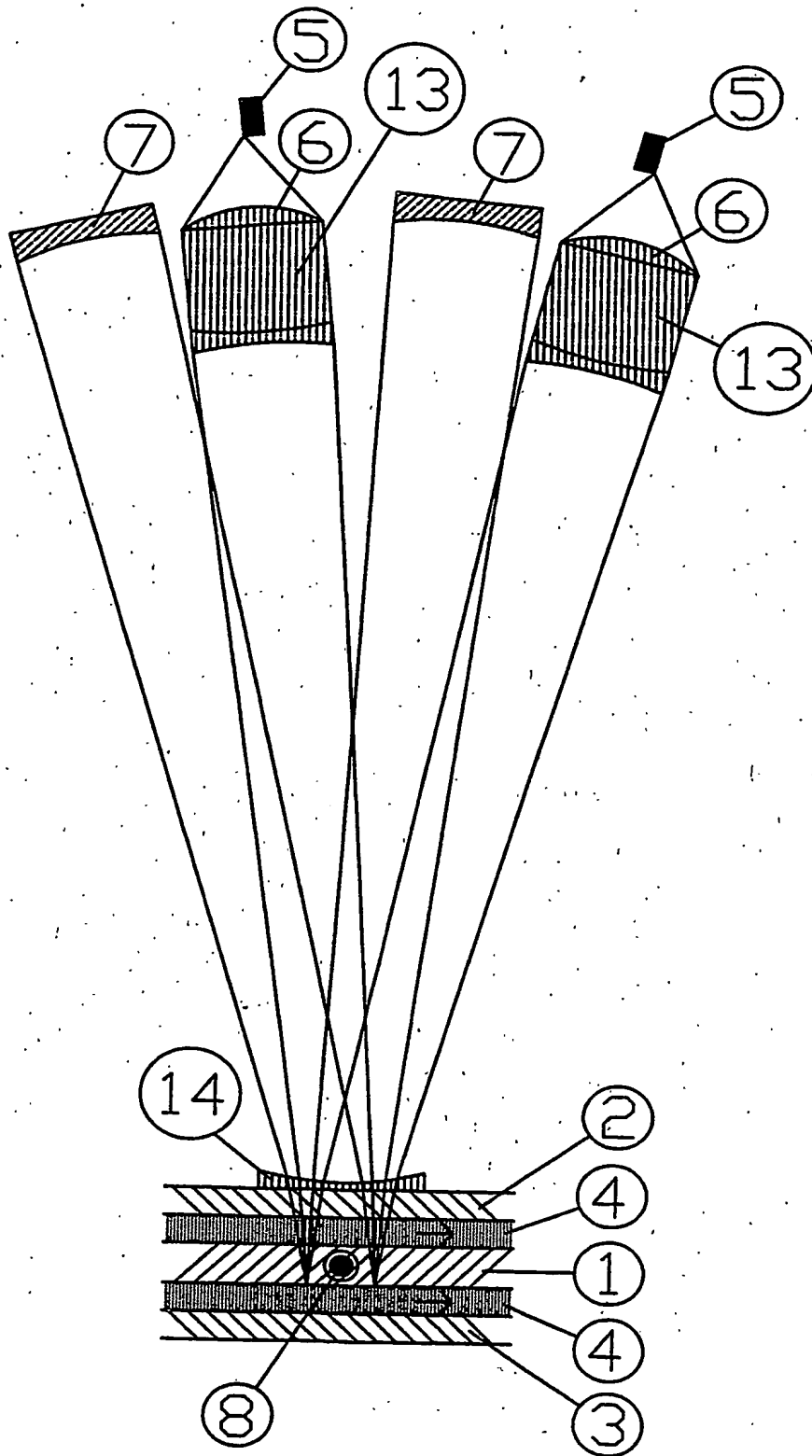


Fig. 4

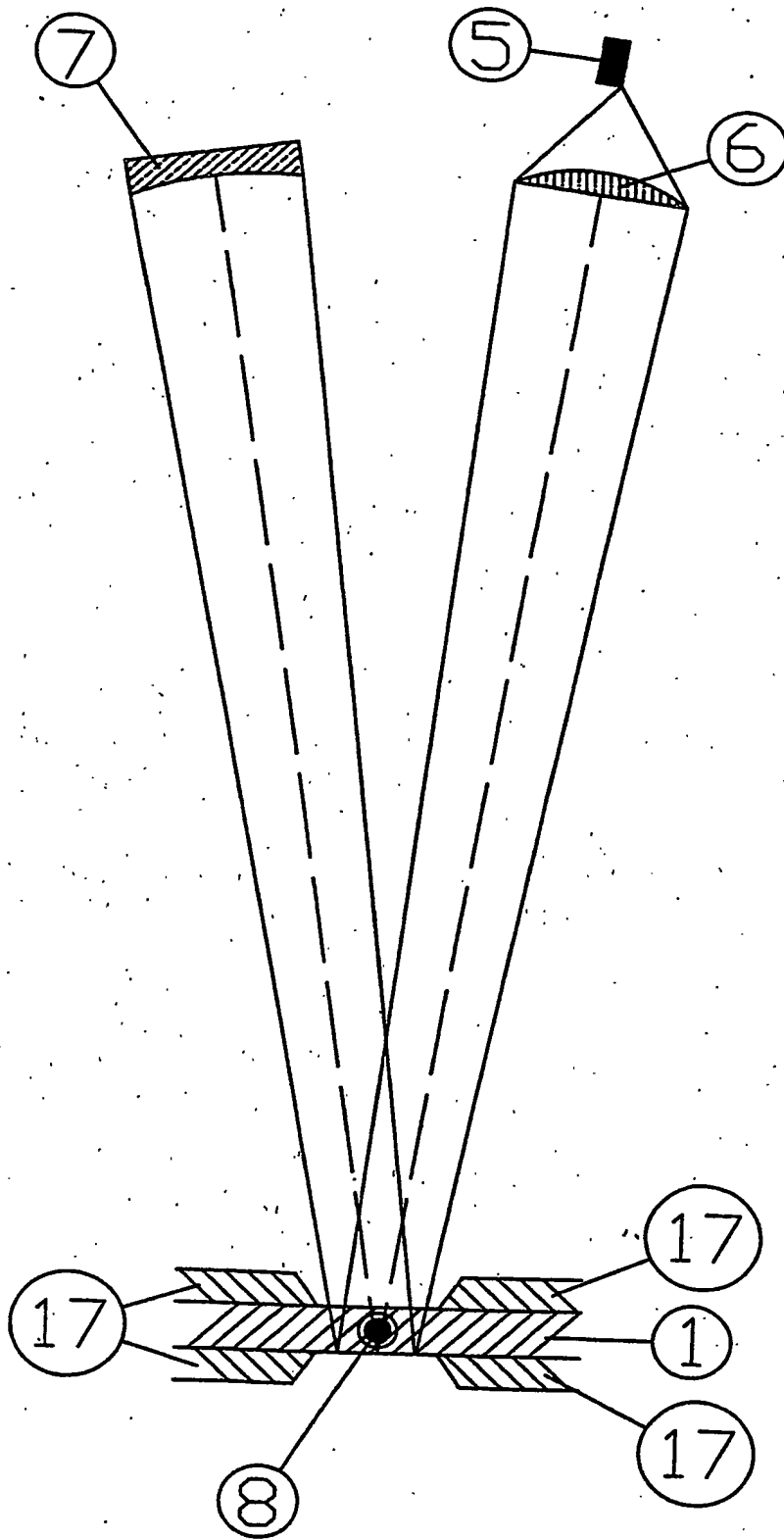


Fig. 5

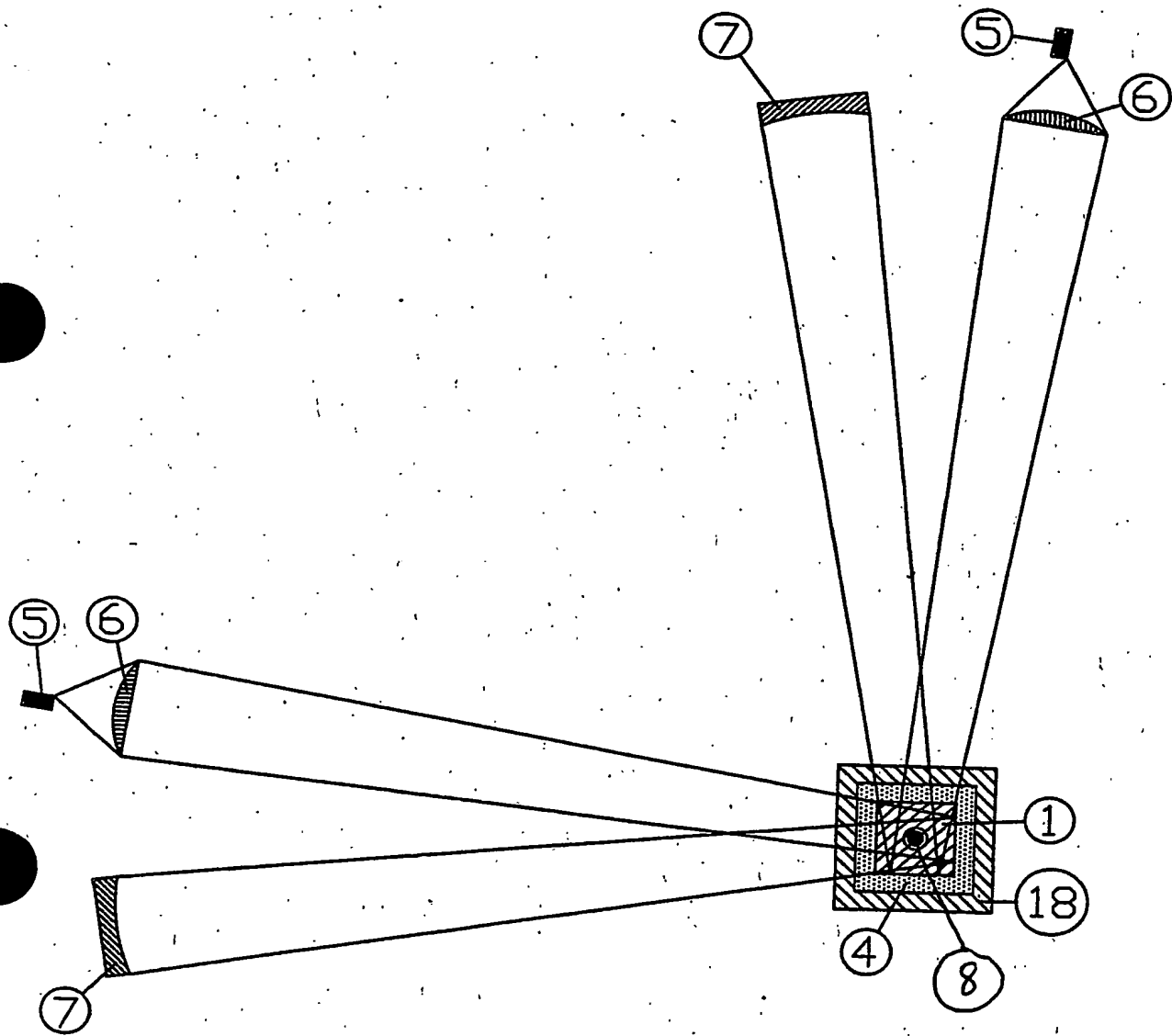


Fig. 6

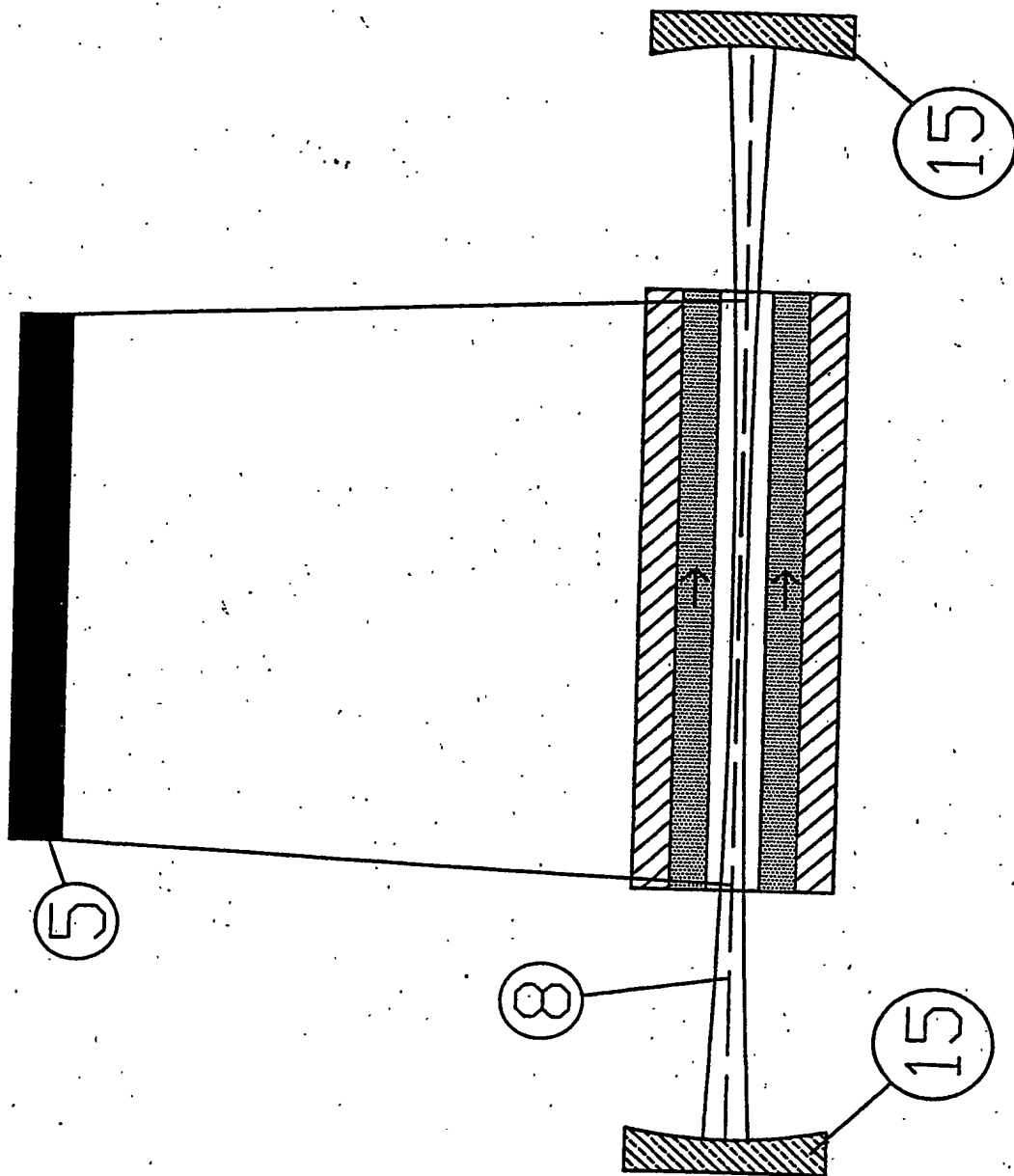
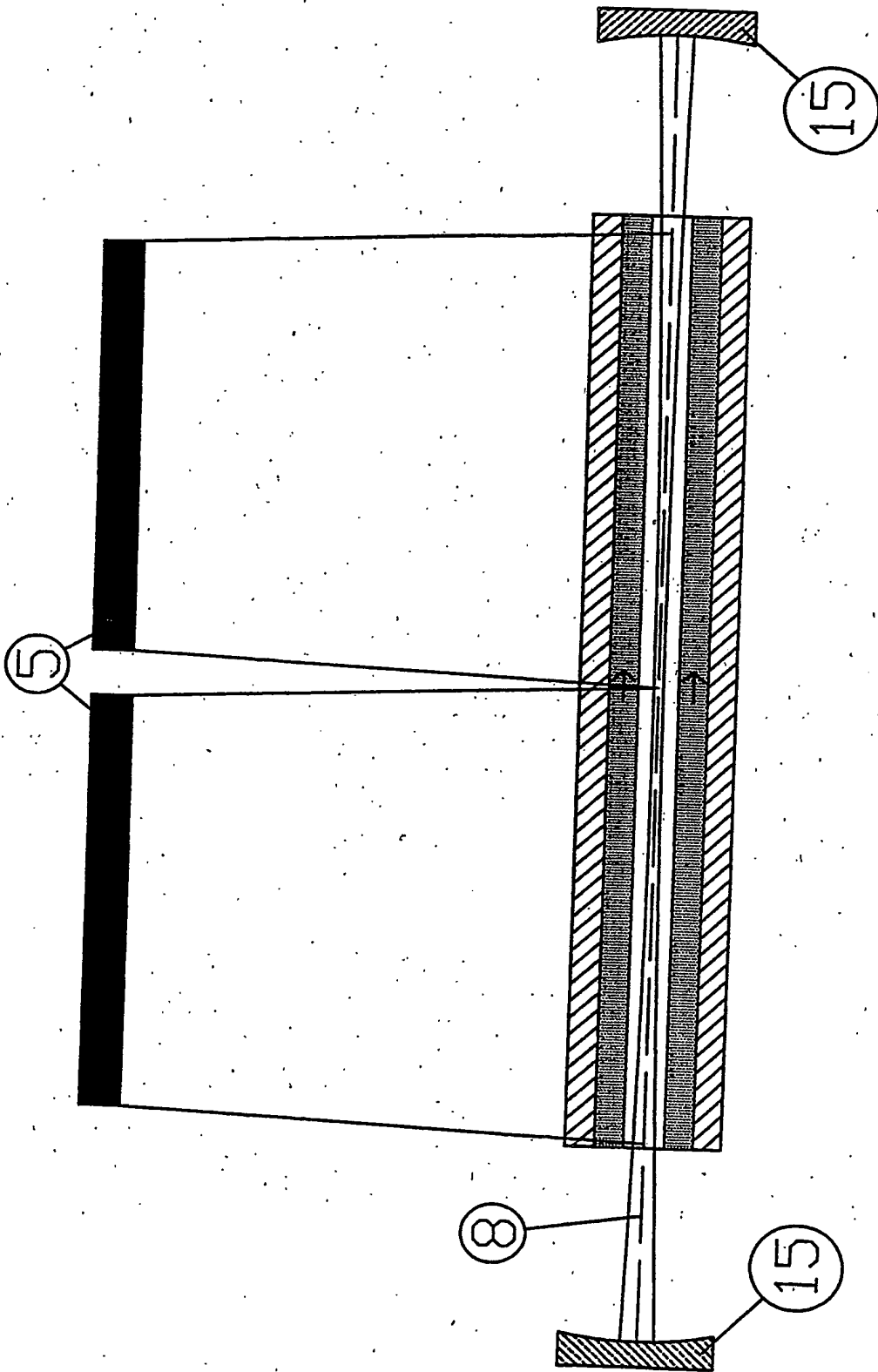


Fig. 7



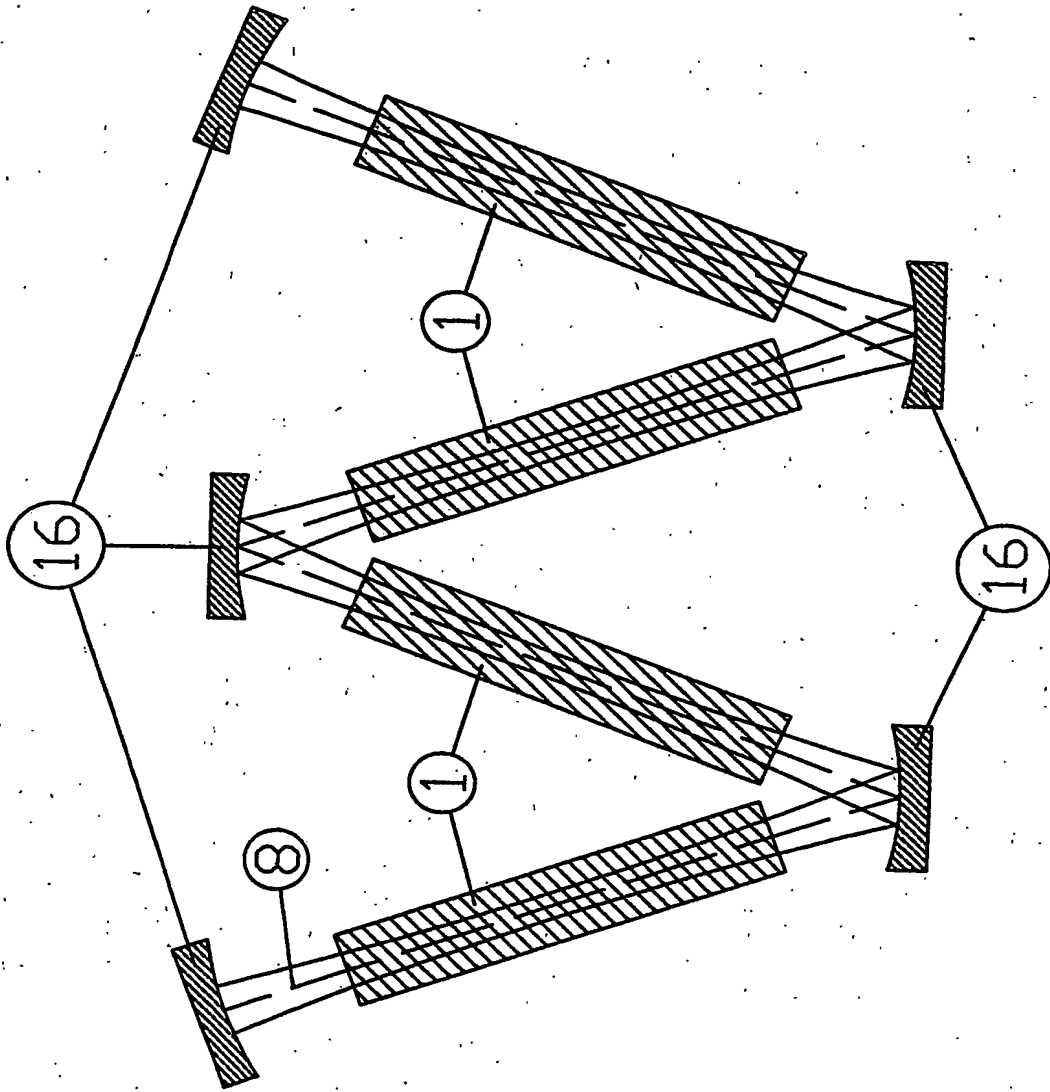


Fig. 9

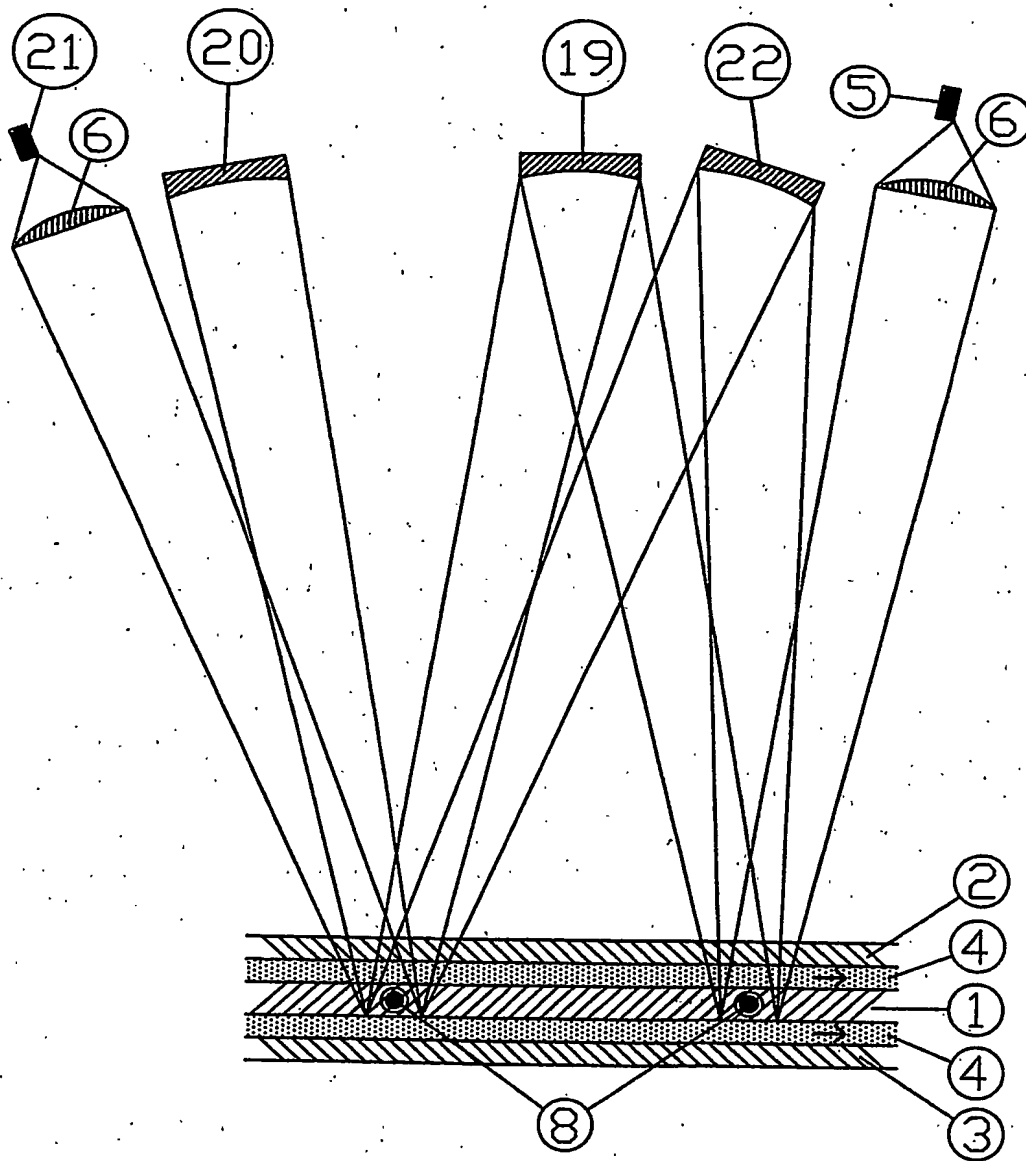


Fig. 10

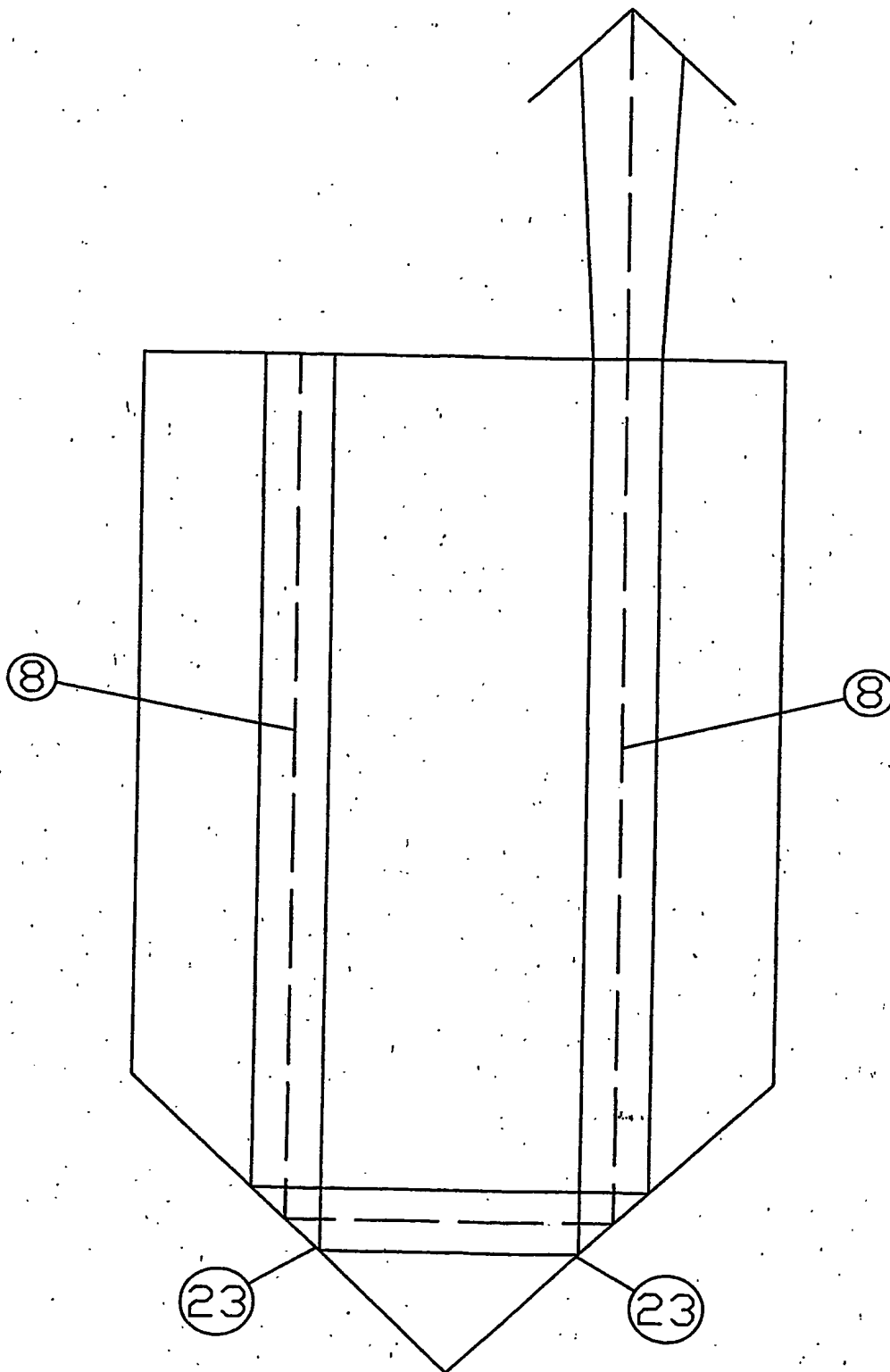


Fig. 11

**This Page is Inserted by IFW Indexing and Scanning
Operations and is not part of the Official Record**

BEST AVAILABLE IMAGES

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images include but are not limited to the items checked:

- ☐ BLACK BORDERS
- ☐ IMAGE CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES
- ☐ FADED TEXT OR DRAWING
- ☐ BLURRED OR ILLEGIBLE TEXT OR DRAWING
- ☐ SKEWED/SLANTED IMAGES
- ☐ COLOR OR BLACK AND WHITE PHOTOGRAPHS
- ☐ GRAY SCALE DOCUMENTS
- ☐ LINES OR MARKS ON ORIGINAL DOCUMENT
- ☒ REFERENCE(S) OR EXHIBIT(S) SUBMITTED ARE POOR QUALITY
- ☐ OTHER: _____

IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.

As rescanning these documents will not correct the image problems checked, please do not report these problems to the IFW Image Problem Mailbox.